

На правах рукописи



Мовчан Андрей Кириллович

**Методы и алгоритмы прецизионного измерения дальности
в активно-импульсных телевизионных измерительных системах**

Специальность 2.2.6. Оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроник» (ТУСУР).

Научный руководитель: **Курячий Михаил Иванович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры телевидения и управления ТУСУР, г. Томск

Официальные оппоненты: **Тихомиров Александр Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории экологического приборостроения Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск;
Баранов Павел Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и видеотехники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), г. Новосибирск

Защита состоится «22» марта 2022 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ТУСУР, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР и на официальном сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/i6h4vbfl>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01,
доктор физико-математических наук



А.Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современные технологии позиционирования объектов в пространстве включают в себя множество задач к которым можно отнести определение координат объектов, габаритов и скорости их перемещения. Актуальной задачей является дистанционное измерение дальности до объектов наблюдения. Вычисление дистанции до объекта для каждой точки его плоского изображения позволяет построить трехмерную картину положения объекта в пространстве.

Активный метод определения дальности может быть успешно применен для разработки систем, позволяющих оценивать дистанцию до объектов наблюдения. К таким системам относятся активно-импульсные телевизионные измерительные системы (АИ ТИС), основным применением которых является обнаружение и распознавание объектов в сложных условиях видения (дым, туман, дождь, снег и т.п.).

Принцип работы АИ ТИС заключается в подсвете объектов интереса лазерным излучателем и приеме отраженного излучения с задержками, соответствующими времени прохождения света до объекта и обратно. Таким образом, фотоприемник системы принимает световое отражение лишь от объектов интереса, при этом игнорируя отражение от помех. Такая особенность позволяет отсеять помеху обратного рассеяния в виде отраженного светового излучения от пыли, тумана, снега и т.п. Подавление помехи обратного рассеяния является одним из основных достоинств таких систем. Этот метод обеспечивает визуализацию пространства в виде узкого слоя, отсекая при этом близкие помехи и фон за объектом. Полученное изображение дает информацию об отражательной способности наблюдаемого объекта и расстояние до него.

Конструктивные особенности и принципы работы АИ ТИС дают возможность измерять расстояния до объектов. Существующие способы определения дальности не соответствуют требованиям по точности измерений. Таким образом, поиск новых способов и алгоритмов прецизионного измерения дальности в АИ ТИС является весьма актуальной задачей.

Задачи, решаемые АИ ТИС, определяют основные сферы применения таких систем, к которым относятся навигация беспилотных транспортных средств, обеспечение безопасности вождения транспортных средств в сложных условиях видения, проведение поисково-спасательных работ, ориентирование на местности и многие другие.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время ведутся исследования как в области разработки АИ ТИС, так и в области методов и алгоритмов для измерительных приложений, основанных на использовании таких систем. Исследованиям АИ ТИС посвящены работы многих известных отечественных и зарубежных ученых, таких как

А.А. Лебедев, А.А. Голицын, А.А. Манцетов, А.К. Цыцулин, В.В. Белов, В.Г. Волков, В.В. Тарасов, И.Л. Гейхман, М.М. Бутслов, П.А. Дегтярев, П.Д. Гиндин, Ю.Г. Якушенков, Ю.К. Грузевич, Ю.Р. Кирпиченко, В.В. Капустин, D.B.

Neumann, H. Heiselberg, L.F. Gillespie, M. Laurenzis, N.S. Kopeika, P. Mariani, S.Y. Chua, X. Wang.

Однако существующие методы и алгоритмы измерения дальности в АИ ТИС имеют небольшой диапазон измерения дальности (от 0,5 м до 5 м) и точность измерения $\pm 0,05$ м, при этом имеют ярко выраженную зависимость точности измерений от форм управляющих импульсов и стабильности их временных параметров. Существующие методы и алгоритмы измерения дальности, обеспечивающие измерения в большом диапазоне (от 10 м до 100 м) имеют низкую точность измерения ± 1 м.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются активно-импульсные телевизионные измерительные системы. Предметом исследования являются методы и алгоритмы измерения дальности в активно-импульсных телевизионных измерительных системах.

Цель и задачи диссертационной работы

Цель диссертационной работы – разработка методов и алгоритмов прецизионного измерения дальности в активно-импульсных телевизионных измерительных системах.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать прецизионный метод измерения дальности в АИ ТИС с широким диапазоном ее определения, обладающий невосприимчивостью к формам управляющих импульсов и нестабильностям их временных параметров.

2. Разработать программные модули для моделирования методов измерения дальности в АИ ТИС.

3. Провести моделирование известных, а также разработанного метода измерения дальности в АИ ТИС с учетом неидеальности форм управляющих импульсов, нестабильностей их временных параметров и шумов фотоприемника.

4. Провести экспериментальные исследования разработанного метода измерения дальности на макете АИ ТИС.

5. Разработать метод дополнительного повышения точности измерения с использованием коррекции нелинейности измерительной функции.

6. Провести экспериментальные исследования разработанного метода с дополнительным алгоритмом повышения точности измерения за счет коррекции нелинейности измерительной функции.

Научная новизна

1. Разработан многозонный метод измерения дальности в АИ ТИС, отличающийся использованием нормированной динамической экспозиции фотоприемника по дальности, который позволяет увеличить диапазон определения расстояний до наблюдаемых объектов при заданной точности.

2. Разработан алгоритм коррекции нелинейности измерительной функции в многозонном методе измерения дальности, основанный на оптимальном выборе значений задержек импульсов стробирования фотоприемника для формирования его динамической экспозиции по критерию минимума среднеквадратической ошибки.

3. Определена потенциальная точность измерения дальности многозонным методом в АИ ТИС с учетом форм импульсов подсвета пространства и стробирования фотоприёмника, нестабильностей их временных параметров, а также влияния шумов фотоприемника, что подтверждает возможность построения прецизионных «карт глубин» пространства.

Методология и методы исследования

В диссертационной работе применены экспериментальные и теоретические методы, заключающиеся в получении основных характеристик расчётным путём и последующем сравнении полученных данных с результатами натуральных испытаний. Среди методов исследования применялись: теория математической статистики, методы цифровой обработки изображений, математическое моделирование.

Достоверность результатов

Достоверность результатов обусловлена методологической обоснованностью исходных теоретических положений, обеспечена организацией опытно-экспериментальной работы с применением методов, адекватных предмету, целям и задачам исследования, обеспечена согласованностью теоретических положений и выводов с экспериментальными данными и результатами, обеспечена устойчивой повторяемостью основных результатов научных исследований.

Теоретическая значимость

1. Предложено аналитическое выражение для вычисления дальности до объектов многозонным методом измерения дальности в АИ ТИС.

2. Предложен алгоритм коррекции нелинейности измерительной функции в многозонном методе измерения дальности.

3. Предложен алгоритм вычисления формы суммарной зоны видения для коррекции нелинейности измерительной функции в многозонном методе измерения дальности.

Практическая значимость

1. Практическое использование предложенного многозонного метода измерения дальности в АИ ТИС позволяет уменьшить влияние форм и стабильности временных параметров импульсов подсвета пространства и стробирования фотоприемника на точность измерения дальности до объектов наблюдения.

2. Реализована программная модель измерения дальности в АИ ТИС, учитывающая формы и нестабильность временных параметров импульсов подсвета пространства и стробирования фотоприемника.

3. Показана возможность повышения точности измерения дальности многозонным методом за счет коррекции нелинейности измерительной функции.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанный многозонный метод измерения дальности в АИ ТИС позволяет повысить точность определения расстояний до наблюдаемых объектов в заданном диапазоне, в частности, при длительности импульса подсвета пространства 30 нс и импульса стробирования фотоприемника 130 нс в диапазоне измерения расстояний от 8 м до 22 м для 20-ти зонного метода измерения дальности получена точность 0,17 м, а в известном методе корреляции «расстояние-интенсивность» точность составила 0,88 м.

2. Разработанный алгоритм коррекции нелинейности измерительной функции многозонного метода измерения дальности в диапазоне от 8 м до 20 м позволяет повысить точность измерения дальности в 2,5 раза, что подтверждено экспериментом, в котором среднеквадратическая ошибка до коррекции составила 0,165 м, а после коррекции 0,066 м.

3. Потенциальная точность измерения дальности до объектов наблюдения 20-ти зонным методом в АИ ТИС составляет 10^{-3} м с учетом реальных форм и нестабильностей временных параметров импульсов подсвета пространства и стробирования фотоприёмника, что подтверждено результатами компьютерного моделирования.

Личный вклад автора

Задачи исследования были сформулированы совместно с научным руководителем работы, который оказывал консультативное содействие и осуществлял верификацию результатов в процессе выполнения работы. Личный вклад автора состоит в планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных результатов, формулировании выводов, разработке программного обеспечения, подготовке и публикации докладов и статей. Все результаты получены автором лично или совместно с соавторами при его непосредственном участии.

Использование результатов исследования

1. НИР «Прецизионное томографическое видение объектов телевизионными измерительными системами с активно-импульсным подсветом пространства», грант РФФИ по научному проекту № 19-37-90141.

2. НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов» (шифр проекта 8.9562.2017/БЧ).

3. Проведение натурных испытаний лабораторного макета АИ ТИС с установкой на разработанный силами Альянса "Техническое зрение" в городе Томске беспилотный автомобиль, который в декабре 2019 г. принял участие в конкурсе «Зимний город» на полигоне в подмосковном городе Дмитров.

4. Проведение натурных испытаний лабораторного макета АИ ТИС в сложных условиях видения при низкой прозрачности среды распространения оптического излучения совместно с ООО «Софт Кристалл» г. Томск.

5. Проведение комплексных испытаний активно-импульсной телевизионной измерительной системы (АИ ТИС) и системы построения ортофотопланов местности беспилотным воздушным судном (СПОМБВС) на полигоне НИИ РТС ТУСУР.

Апробация результатов исследования

Основные положения данной работы докладывались и обсуждались на следующих 8 конференциях: Международная научно-практическая конференция «Распознавание 2017», Курск, 2017; Международная научно-практическая конференция «Распознавание 2018», Курск, 2018; XIV Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», Томск, 2018; XV Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», Томск, 2019; XVI Международная научно-

практическая конференция «Электронные средства и системы управления», Томск, 2020; 28-ая Международная конференция по компьютерной графике, обработке изображений и машинному зрению «Графикон 2018», Томск, 2018; International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Томск, 2019; 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Russia, 2020.

Публикации

По результатам исследований опубликовано 18 работ: 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 1 статья в журнале, проиндексированном в Scopus, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 13 докладов в трудах международных конференций, 7 из которых проиндексированы в наукометрических базах Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 103 наименований и двух приложений. Общий объем диссертации составляет 141 страниц машинописного текста, включая 82 рисунка и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены цель и задачи исследования, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен аналитический обзор методов определения дальности до объектов в АИ ТИС. Рассмотрены принципы работы АИ ТИС, а также область их применения. Описан процесс формирования активных зон видения (АЗВ), а также факторов, влияющих на их форму. Описан принцип построения АИ ТИС, использующих в качестве быстродействующего оптического затвора электронно-оптический преобразователь (ЭОП). Приведены примеры таких систем. На рисунке 1 представлена структурная схема АИ ТИС.

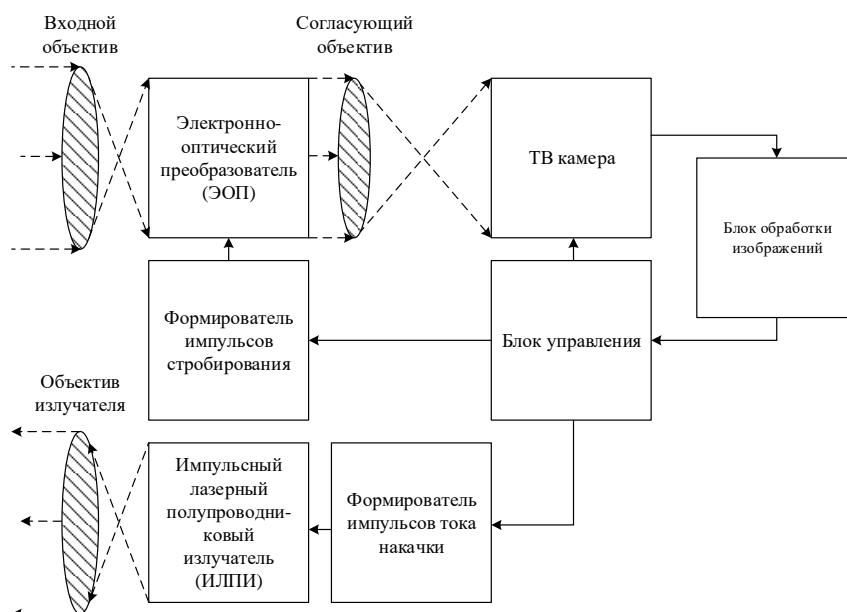


Рисунок 1 – Структурная схема АИ ТИС

Представлено описание электронно-оптических преобразователей и дана их классификация. Уделено внимание структуре устройства подсвета пространства и импульсному излучателю, применяемому в АИ ТИС. Описан принцип построения фотоприемников АИ ТИС неиспользующих ЭОП и приведены примеры таких систем. Рассмотрено устройство времяпролетных камер и использующиеся в них методы измерения дальности. Рассмотрены известные методы и алгоритмы определения дальности и построения «карт глубин» пространства в АИ ТИС.

Во второй главе представлен разработанный автором многозонный метод измерения дальности (ММИД), позволяющий производить измерения дальности в АИ ТИС используя короткий по длительности импульс подсвета пространства (ИПП) и обладающий, таким образом, потенциально более широким диапазоном измерения дальности, чем в известном методе корреляции «расстояние-интенсивность», являющегося двухзонным методом измерения дальности (ДМИД). Представлен предлагаемый алгоритм повышения точности измерения дальности в ММИД. Разработанный метод измерения дальности позволяет в широких пределах регулировать динамический диапазон определения расстояний без изменения длительности ИПП. ММИД основан на использовании двух видеокadres, полученных в АИ ТИС. Результатом применения ММИД в АИ ТИС является получение результирующего изображения, в котором значения яркостей пикселей соответствуют дистанции до наблюдаемых объектов. Описаны две реализации ММИД, отличающиеся способом формирования суммарной АЗВ. ММИД реализуется в АИ ТИС следующим образом. Системой формируются два последовательных видеокadra. Первый видеокادر содержит определенное количество протяженных (на желаемый диапазон измерения дальности) АЗВ с некоторой постоянной начальной задержкой стробирования, причем АЗВ в первом видеокadre формируется за счет импульса стробирования фотоприемника (ИСФ) большой длительности и ИПП малой длительности.

Значение яркости пикселя I_1 с координатами (x, y) в первом видеокadre можно представить в следующем виде:

$$I_1(x, y) = I(x, y, \tau_{d_0}) \cdot N, \quad (1)$$

где $I(x, y, \tau_{d_0})$ – яркость пикселя с координатами (x, y) в АЗВ с задержкой стробирования τ_{d_0} ; N – количество АЗВ в видеокadre.

Второй видеокادر формируется из определенного количества смещенных относительно друг друга локальных АЗВ с уменьшающейся протяженностью, что достигается дискретным изменением величин задержки и длительности ИСФ за время одного кадра. Значение яркости пикселя I_2 с координатами (x, y) во втором видеокadre можно представить в следующем виде:

$$I_2(x, y) = \frac{N}{M} \cdot \sum_{m=1}^M I \left[(x, y, (\tau_{d_0} + (m-1) \cdot \Delta\tau_d)) \right], \quad (2)$$

где M – количество различных временных задержек стробирования; $\Delta\tau_d$ – шаг временной задержки стробирования.

Для упрощения конструкции блока формирования ИСФ в АИ ТИС был предложен модифицированный метод формирования суммарной АЗВ с линейным

участком во втором видеокadre. Основное отличие модифицированного метода формирования суммарной АЗВ от рассмотренного выше заключается в том, что второй видеокadre формируется из определенного количества смещенных относительно друг друга локальных АЗВ с постоянной протяженностью, равной протяженности АЗВ в первом кадре, что достигается только за счет дискретного изменения величины задержки ИСФ за время одного кадра. На рисунке 2,а представлен метод формирования суммарной АЗВ во втором видеокadre (красный график) с сокращением протяженности и сдвигом по дальности каждой последующей локальной зоны (черные графики), а на рисунке 2,б модифицированный метод формирования суммарной АЗВ без сокращения протяженности.

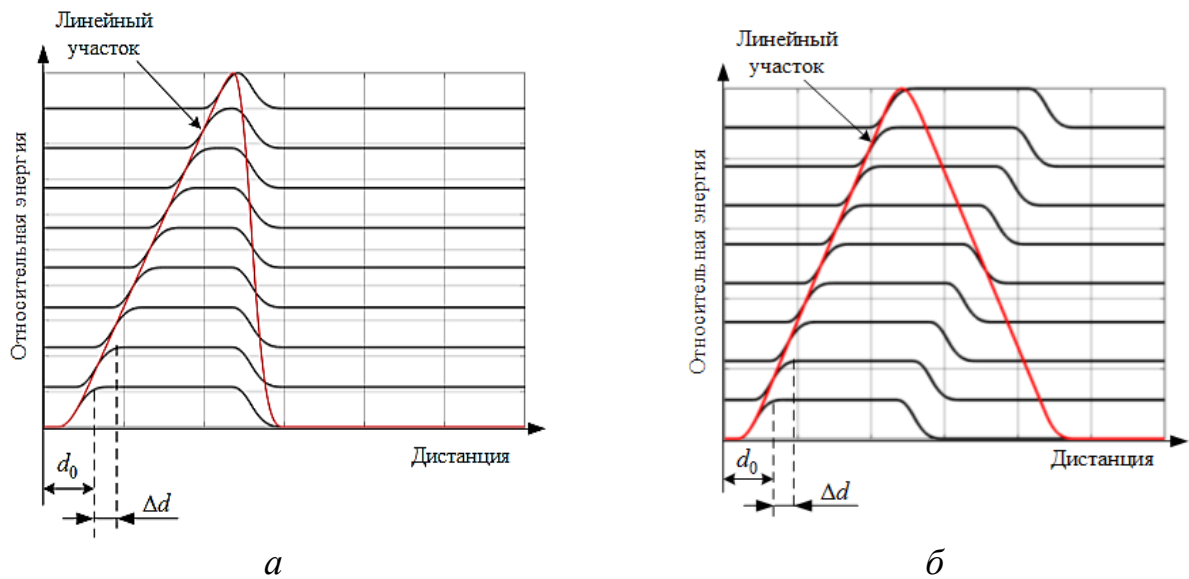


Рисунок 2 – Метод формирования суммарной АЗВ (а) и его модификация (б)

Для получения в реальных условиях линейного измерительного участка зависимости яркости объектов в поле зрения системы от дальности до них (рисунок 2) необходимо выполнить нормировку суммарной АЗВ. Нормировка выполняется путем деления значений яркостей пикселей I_2 в видеокadre, содержащем суммарную АЗВ на значения яркостей пикселей I_1 видеокadre в первой АЗВ согласно следующему выражению:

$$I_3(x, y) = \frac{I_2(x, y)}{I_1(x, y)} = \frac{N}{M} \cdot \frac{\sum_{m=1}^M I[x, y, (\tau_{d_0} + (m-1) \cdot \Delta\tau_d)]}{I(x, y, \tau_{d_0}) \cdot N}. \quad (3)$$

Так как в обоих видеокadre, содержащих первую (нормирующую) и суммарную АЗВ будет действовать закон обратных квадратов, одинаково искажающий их форму, то при использовании выражения (3) в результирующем видеокadre будет восстановлена прямая пропорциональная зависимость яркости объектов, находящихся в поле зрения системы от расстояния до них.

На рисунке 3 показаны реальные формы и относительное расположение первой (нормирующей) и суммарной АЗВ, а также результат их деления с учетом искажений, вызванных законом обратных квадратов.

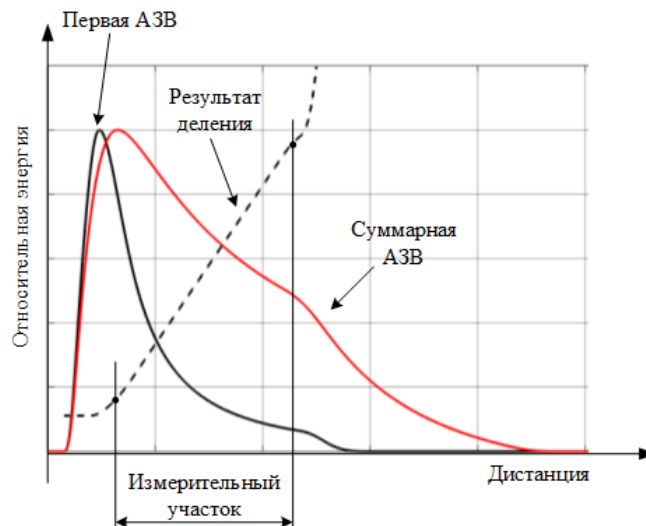


Рисунок 3 – Расположение реальных АЗВ и результата их деления в ММИД

На рисунке 4 представлено временное расположение формируемой и результирующей последовательности видеокадров в ММИД.

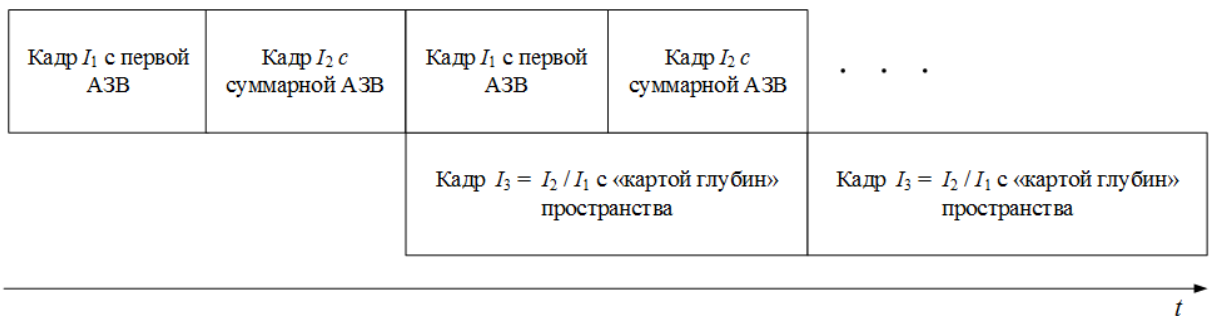


Рисунок 4 – Последовательность видеокадров в ММИД

Согласно временному расположению видеокадров в ММИД, представленному на рисунке 4, в каждом нечетном кадре формируется первая АЗВ, а в каждом четном кадре суммарная АЗВ. При этом результирующая последовательность видеокадров их отношения, содержащая информацию о дальности до объектов наблюдения будет иметь вдвое меньшую частоту следования.

Далее в главе 2 представлен разработанный алгоритм повышения точности измерения дальности ММИД, заключающийся в коррекции нелинейности измерительной функции ММИД путем предварительного искажения формы суммарной АЗВ. В результате влияния инерционности цепи управления фотоприёмником АИ ТИС форма АЗВ может быть искажена и при этом возникает нелинейность измерительной функции в ММИД, приводящая к систематической ошибке измерения дальности. Предлагается алгоритм повышения линейности измерительной функции, заключающейся в формировании суммарной АЗВ заданной формы таким образом, чтобы после ее деления на нормирующую АЗВ была получена измерительная функция с более высокой степенью линейности.

Формирование суммарной АЗВ с заданной формой осуществляется за счет задания частных задержек стробирования для каждой локальной АЗВ, входящей в суммарную. При этом происходит перераспределение энергии в суммарной АЗВ за счет чего и достигается произвольность ее формы и повышение линейности

измерительной функции в ММИД. Процесс формирования суммарной АЗВ в данном случае можно представить в виде выражения (4), представляющего собой значение яркости пикселя I_2 с координатами (x, y) во втором видеокадре,

$$I_2(x, y) = \frac{N}{M} \cdot \sum_{m=1}^M I[x, y, (\tau_{d_0} + \tau_{dm})], \quad (4)$$

где τ_{dm} – задержка стробирования для локальной АЗВ с номером m .

В работе представлена блок-схема алгоритма расчета необходимой предсказанной формы суммарной АЗВ. Предлагаемый алгоритм заключается в предварительном измерении формы АЗВ в реальной АИ ТИС. На основе измеренной формы реальной АЗВ вычисляется требуемая предсказанная форма суммарной АЗВ.

В главе 3 приведены результаты компьютерного моделирования ДМИД и ММИД. Проведена оценка потенциальной точности методов измерения дальности АИ ТИС. Представлены результаты моделирования влияния шумов фотоприемника на потенциальную точность измерения дальности в 20-ти зонном ММИД. Представлены результаты моделирования влияния «джиттера» длительности ИПП на потенциальную точность измерения дальности в 20-ти зонном ММИД.

Моделирование оценки влияния формы ИПП на потенциальную точность измерения дальности в ДМИД и ММИД проводилось для форм АЗВ, соответствующей свертке как идеализированной, так и квазиреальной формы ИПП с идеализированной формой ИСФ. На рисунке 5,а представлен график абсолютной ошибки измерительной функции по дальности для ДМИД при квазиреальной форме ИПП, а на рисунке 5,б для ММИД при квазиреальной форме ИПП (пунктирный график) и (сплошной график) при идеализированной форме ИПП.

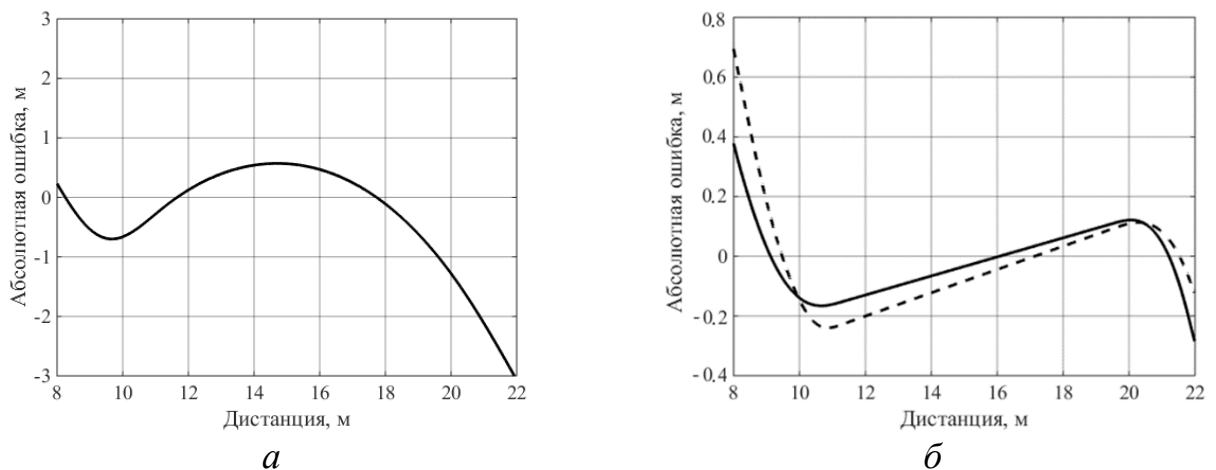


Рисунок 5 – Абсолютная ошибка измерительной функции для ДМИД (а) и для ММИД (б)

По результатам моделирования влияния формы ИПП на линейность измерительной функций ДМИД значение среднеквадратической ошибки измерения дальности составило 0,88 м в диапазоне измерений от 8 м до 22, а для ММИД 0,17 м в том же диапазоне дальностей. Таким образом, форма ИПП в ММИД оказывает незначительное влияние на линейный участок измерительной

функции, и, следовательно, на точность измерения дальности. При этом в ДМИД искажение формы оптического импульса подсвета приводит к существенному нарушению линейности измерительной функции.

Далее в главе 3 получена зависимость ошибки измерения дальности от количества АЗВ для ММИД. Было рассмотрено изменение зависимости среднеквадратической ошибки измерения дальности при изменении количества локальных АЗВ от 2 до 10. Зависимость среднеквадратической ошибки измерения дальности от количества локальных АЗВ в ММИД представлена на рисунке 6.

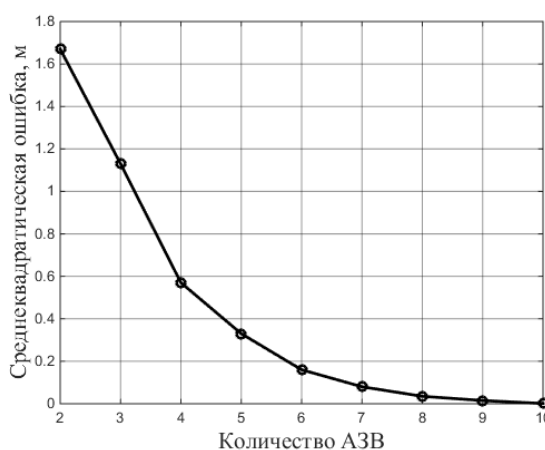


Рисунок 6 – Зависимость среднеквадратической ошибки измерения дальности в ММИД от количества локальных АЗВ

Установлено, что при увеличении количества АЗВ в ММИД ошибка определения дальности уменьшается, а при количестве АЗВ равном десяти составляет единицы миллиметров. В общем случае главным условием применения ММИД является то, что шаг по задержке стробирования для каждой из локальных АЗВ, входящих в суммарную АЗВ, должен быть много меньше протяженности фронта суммарной АЗВ в пространстве, в противном случае измерительная функция будет иметь колебательный характер.

Далее в главе 3 представлены результаты компьютерного моделирования влияния аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) оптико-электронного приёмного тракта на потенциальную точность измерения дальности ММИД в АИ ТИС, а также результаты моделирования влияния «джиттера» длительности ИПП на потенциальную точность измерения дальности в 20-ти зонном ММИД.

При моделировании влияния АБГШ на потенциальную точность измерения дальности в ММИД к каждому отсчету нормирующей и суммарной АЗВ было добавлено случайное значение АБГШ с нулевым математическим ожиданием и заданным значением дисперсии – σ^2 . Для численной оценки влияния АБГШ на потенциальную точность измерения дальности в 20-ти зонном ММИД было произведено 50 итераций моделирования для значения $\sigma = 1$. Произведена статистическая обработка 50-ти зависимостей абсолютных ошибок измерения от расстояния путем вычисления среднеквадратической ошибки (СКО) по дальности шагом 1 м в диапазоне от 8 м до 22 м. На рисунке 7,а представлен график зависимости СКО измеренной дальности в 20-ти зонном ММИД от расстояния при АБГШ с $\sigma = 1$. При моделировании влияния «джиттера» длительности ИПП на

потенциальную точность измерения дальности в ММИД было произведено 50 итераций моделирования для значения «джиттера» длительности ИПП от 0,5 нс до 5 нс. На рисунке 7,б представлен график зависимости СКО измерения дальности в ММИД для значений «джиттера» ИПП от 0 нс до 5 нс.

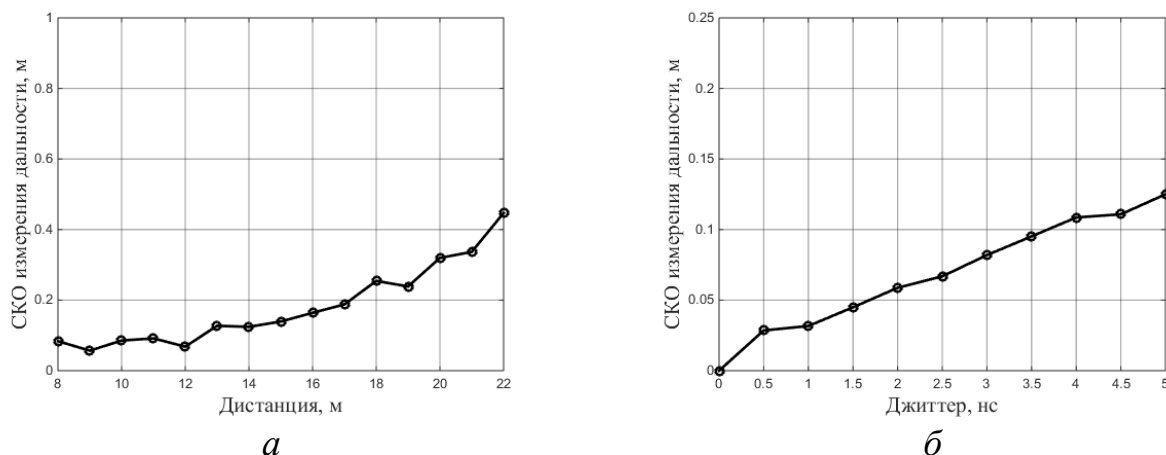


Рисунок 7 –Зависимость значения СКО измерения дальности для ММИД от шумов фотоприёмника (а) и от «джиттера» ИПП (б)

Из полученных результатов следует, что при стационарном уровне шумов фотоприемника потенциальная точность измерения дальности в 20-ти зонном ММИД уменьшается с увеличением дальности. По результатам моделирования оценки влияния нестабильности длительности ИПП на потенциальную точность измерения дальности в 20-зонном ММИД можно сделать вывод о слабой зависимости точности измерения дальности от расстояния при значениях нестабильности длительности («джиттера») ИПП, имеющих в реальной аппаратуре (от 0,1 нс до 1 нс).

В четвёртой главе представлены результаты экспериментального исследования ММИД в АИ ТИС. На рисунке 8 представлен вид экспериментального макета АИ ТИС, разработанного на кафедре ТУ ТУСУР. Разработан блок управления системой, реализующий алгоритмы ММИД.

Особенностью схемы формирования импульсов блоком управления является реализация прецизионного шага изменения параметров длительности и задержки выходных импульсов. Минимальный шаг изменения параметров длительности и задержки выходных импульсов составляет 100 пс, что реализовано на основе управляемого модуля фазовой автоподстройки тактовой частоты в ПЛИС.



Рисунок 8 – Внешний вид экспериментального макета АИ ТИС

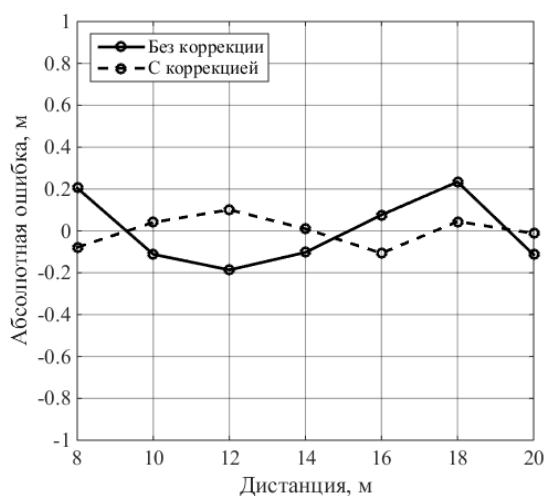
Далее в главе 4 представлены результаты эксперимента с измерением дальности до объекта, расположенного в поле зрения системы для 20-ти зонного ММИД без применения алгоритма коррекции и с применением коррекции нелинейности измерительной функции. Эксперимент проводился с изменением дистанции до объектов от 8 до 20 м с шагом 2 м.

В таблице 1 приведены результаты измерения дальности до транспарантов для 20-ти зонного ММИД. Для сравнения в таблицу 1 также включены значения дистанции до транспаранта измеренные лазерным дальномером.

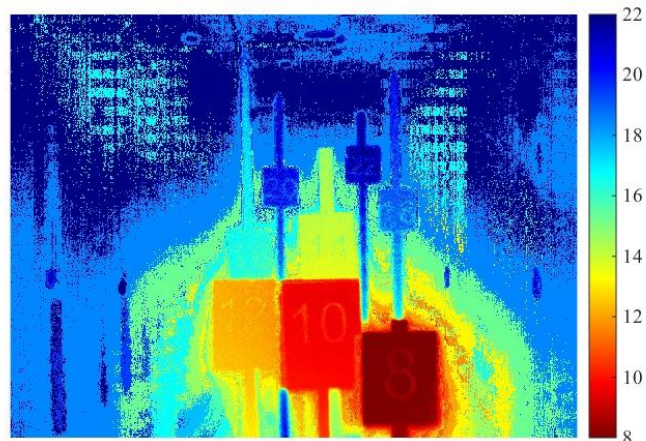
Таблица 1 – Измеренная дистанция до транспарантов для 20-ти зонного ММИД

Измеренная дистанция лазерным дальномером, м	Измеренная дистанция 20 зон ММИД (без коррекции), м	Измеренная дистанция 20 зон ММИД (с коррекцией), м
8,030	8,204	7,921
10,038	9,888	10,041
12,004	11,813	12,101
13,970	13,897	14,009
15,996	16,076	15,893
18,050	18,234	18,045
19,983	19,886	19,988

На рисунке 9,*а* представлены графики абсолютной ошибки измерения дальности до коррекции (сплошная) и после коррекции (пунктир), а на рисунке 9,*б* построенная на основе ММИД «карта глубин» пространства.



а



б

Рисунок 9 – Абсолютная ошибка измерения дальности (*а*) и «карта глубин» пространства (*б*)

По результатам экспериментальных исследований получено уменьшение среднеквадратического значения ошибки измерения дальности с 0,165 м до 0,066 м в диапазоне дальностей от 8 м до 20 м. при использовании алгоритма коррекции нелинейности измерительной функции в 20-ти зонном ММИД.

Далее в главе 4 представлены экспериментальные исследования АИ ТИС на полигоне. Для исследования ММИД в АИ ТИС при реальных условиях были проведены натурные испытания экспериментального макета системы на полигоне НИИ РТС ТУСУР. Испытания на полигоне проводились с использованием системы

построения ортофотопланов местности беспилотным воздушным судном (СПОМБВС) и геодезическим средством измерения, являющимся эталонным для построения плана местности и фиксации расстояний между объектами на местности. В таблице 2 представлены результаты измерения расстояний до объектов на полигоне.

Таблица 2 – Результат измерения расстояний до объектов на полигоне

Объект измерения	Средство измерения		
	АИ ТИС, м	Лазерный дальномер, м	Геодезический прибор, м
Транспарант 1	11,12	11	10,94
Транспарант 2	18,5	19,06	18,95
Транспарант 3	34,78	34,97	34,74
Транспарант 4	39,62	39,95	39,74
КУНГ пр. край	25,6	25,44	-
КУНГ центр	26	25,88	-
Антенна пр. край	37,45	37,68	-
Грузовик борт	16,26	16,51	-

В таблице 3 представлена разность результатов измерения расстояний до объектов на полигоне с использованием АИ ТИС и лазерного дальномера.

Таблица 3 – Разность измерений расстояний АИ ТИС и лазерным дальномером

Объект измерения	Разность измерений АИ ТИС и лазерного дальномера, м
Транспарант 1	+0,12
Транспарант 2	-0,56
Транспарант 3	-0,19
Транспарант 4	-0,33
КУНГ пр. край	+0,16
КУНГ центр	+0,12
Антенна пр. край	+0,23
Грузовик борт	-0,25

На рисунке 10 представлены «карты глубин» для областей местности на полигоне, содержащих антенну и транспаранты.

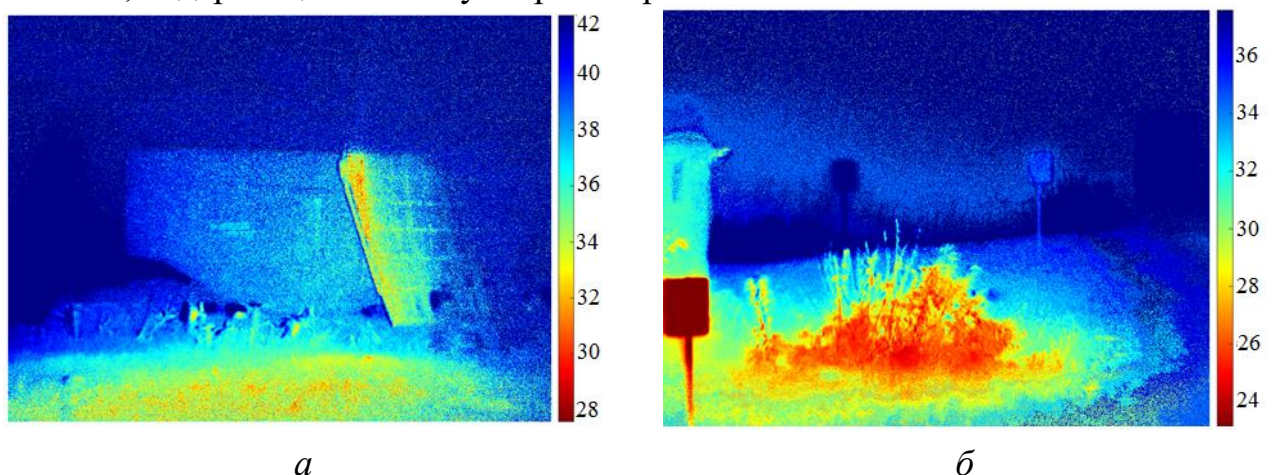


Рисунок 10 – Построенные «карты глубин» в области антенны (а), и области с транспарантами (б)

Испытания АИ ТИС на полигоне показали, что разработанный в АИ ТИС многозонный метод измерения дальности до объектов наблюдения и построения «карты глубин» пространства имеет дециметровую точность измерения расстояний до объектов на рассматриваемой трассе по сравнению с образцовым лазерным дальномером, имеющим миллиметровую точность измерения расстояний, который в данных испытаниях считался эталонным средством измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные результаты работы, подтверждающие достижение цели исследования по разработке методов прецизионного измерения дальности в активно-импульсных телевизионных измерительных системах (АИ ТИС).

1. Разработан и исследован многозонный метод измерения дальности (ММИД) для АИ ТИС.

2. Проведено компьютерное моделирование ММИД в АИ ТИС, которое подтверждает достоверность данного метода измерения дальности в АИ ТИС. При моделировании ММИД получены результаты для разного количества активных зон видения (АЗВ). При этом установлено, что при увеличении количества локальных АЗВ в ММИД абсолютная ошибка определения дальности уменьшается и достигает миллиметровой точности при количестве локальных АЗВ равным 10. Проведено компьютерное моделирование влияния шумов фотоприемника и нестабильности временных параметров импульса подсвета пространства (ИПП) и импульса стробирования фотоприемника (ИСФ) в АИ ТИС.

3. Предложен способ повышения линейности измерительной функции в ММИД, позволяющий повысить точность измерения дальности до объектов в 2,5 раза.

4. Разработано программное обеспечение «Вычислитель активных зон видения томографических систем», позволяющее производить моделирование ММИД и оценивать его точностные характеристики при различных параметрах и формах ИПП и ИСФ в АИ ТИС. На данную программу получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ (№ 2021610608).

5. Разработан блок формирования сигналов на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) для управления фотоприемником и устройством подсвета АИ ТИС. Особенностью разработанного блока управления является прецизионный шаг установки задержек и длительностей формируемых импульсов равный 100 пс.

6. Проведены натурные испытания ММИД с использованием предложенного алгоритма коррекции нелинейности и без него. При этом для ММИД использующего 20 локальных АЗВ на трассе протяженностью от 8 м до 20 м среднеквадратическая ошибка измерения дальности составила 0,16 м, а с коррекцией нелинейности измерительной функции 0,06 м. Проведены экспериментальные исследования оценки влияния шумов фотоприемника в экспериментальном макете АИ ТИС на точность измерения дальности ММИД.

Таким образом, в диссертационной работе в соответствии с сформулированной целью содержится решение задач по разработке методов

прецизионного измерения дальности в АИ ТИС, имеющих существенное значение для отрасли знаний фотоники и оптико-электронного приборостроения.

Рекомендации по использованию результатов исследования.

1. Для уменьшения влияния форм и стабильности временных параметров ИПП и ИСФ на точность измерения дальности в АИ ТИС рекомендуется использовать ММИД.

2. Для повышения точности измерения дальности в ММИД рекомендуется использовать алгоритм коррекции нелинейности измерительной функции путем внесения предскажений формы измерительной АЗВ в ММИД.

Дальнейшим развитием исследований в данном направлении является разработка методов и алгоритмов прецизионного измерения дальности в условиях низкой прозрачности среды распространения оптического излучения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Мовчан А.К. Методы и алгоритмы прецизионного измерения дальности активно-импульсными телевизионными измерительными системами / Мовчан А.К., Капустин В.В., Курячий М.И., Чалдина Е.С. // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 7–14.

2. Мовчан А.К. Блок управления активно-импульсных телевизионных систем / А. К. Мовчан [и др.] // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 4. – С. 16–20.

3. Мовчан А. К., Белов В. В., Гриднев Ю. В., Капустин В. В., Козлов В. С., Кудрявцев А. Н., Курячий М. И., Рахимов Р. Ф., Панченко М. В., Шмаргунов В. П. Экспериментальная оценка частотно-контрастных характеристик активно-импульсных телевизионных систем видения в условиях повышенной мутности аэрозольных сред. // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 09. – С. 771–775.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021612745 Российская Федерация. Вычислитель активных зон видения томографических систем / Е.С. Чалдина, А.К. Мовчан, В.В. Капустин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». – № 2021612745; заявл. 27.01.2020; опубл 24.02.2021. – 1 с.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и WoS

5. Movchan, A., Kapustin, V., & Kuryachiy, M. (2017, June). Vision area parameters analysis for active-pulse television-computing systems. In 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (pp. 1-5). IEEE.

6. Movchan, A. K., Kapustin, V.V., Zaytseva, E. V., & Kuryachy, M. I. (2018). Active pulse television measuring systems for ensuring navigation of transport means in heavy weather conditions. *Transportation systems and technology*, 4(1), pp. 68-83.

7. Movchan, A. K. et al. Multi-Area Range Measurement Method Using Active-Pulse Television Measuring Systems //2020 21st International Conference of Young

Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – IEEE, 2020. – pp. 293–297.

8. Movchan, A., Kapustin, V., Kuryachiy, M., & Chaldina, E. (2020). Statistical Analysis and Experimental Evaluation of Active-Pulse Television Measuring Systems Vision Zone Shapes. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1488, p. 012006).

9. Movchan, A., Kapustin, V., Kuryachiy, M., & Chaldina, E. (2020, March). Active-pulse television measuring systems images space-time filtration by range. In: *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1488, - pp. 012-032.

10. Movchan, A.K. Study of the Time-of-Flight Method for Measuring Distances to Objects Using an Active-Pulse Television Measuring System / E.S. Chaldina, Movchan A.K., Kapustin V.V. – 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), 2019.– pp. 0457–0461.

11. Movchan A. et al. Software tool for modelling active vision areas of tomographic systems // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1862. – №. 1. – P. 012-015.

12. Movchan, A. K., Belov, V. V., Gridnev, Y. V., Kapustin, V. V., Kudryavtsev, A. N., Kuryachii, M. I., ... & Shmargunov, V. P. (2019). Experimental Estimation of Frequency-Contrast Characteristics of Active Pulsed Television Systems under Conditions of Enhanced Turbidity of Aerosol Media. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 32(1), pp.103-107.

Публикации в трудах конференций

13. Мовчан А.К. Статистический анализ и экспериментальная оценка форм зон видения активно-импульсных телевизионных измерительных систем / А.К. Мовчан, В.В. Капустин, М.И. Курячий, Е.С. Чалдина // *Электронные средства и системы управления: материалы докладов XV Международной научно-практической конференции (20–22 ноября 2019 г.): в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2019. – С. 188-192.*

14. Movchan, A. K., Kapustin, V. V., Kuryachiy, M. I. (2018). Methods and means of tomographic vision of space by active-pulse television measurement systems. In *GraphiCon 2018-28th International Conference on Computer Graphics and Vision* (pp. 222-225).

15. Мовчан А.К. Вычислитель активных зон видения томографических систем / Е.С. Чалдина, А.К. Мовчан, В.В. Капустин, М.И. Курячий, // *Электронные средства и системы управления: материалы докладов XVI Международной научно-практической конференции (18–20 ноября 2020 г.): в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2020. – С. 169-172.*

16. Мовчан, А.К. Анализ особенностей изображений активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем / В.В. Капустин, А.К. Мовчан, М.И. Курячий // *Материалы международной научно-технической конференции «Опτικο-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации «Распознавание - 2017».* Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2017. – С. 188-190.

17. Мовчан, А. К., Капустин, В. В., Курячий, М. И. Оценка дальности до наблюдаемых объектов активно-импульсными телевизионными измерительными системами. // *Материалы международной научно-технической конференции*

«Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации «Распознавание - 2018». Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2018. – С. 175-177.

18. Мовчан, А.К. Капустин, В.В. Айсабек, С.А. Оценка отношения сигнал/помеха обратного рассеяния в активно-импульсных телевизионных вычислительных системах / А.К. Мовчан, В.В. Капустин, С.А. Айсабек // Межд. науч. -практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – 2018. В 2 ч. – Ч. 2. – С. 177–180.